

测量用互感器及其测试仪器的发展和创新

赵修民, 赵屹涛

(山西省互感器研究所, 太原 030009)

[摘要] 详细分析了国内50年代以来, 随着生产发展和市场需要, 测量用互感器及其测试仪器在提高准确度和性能方面的发展与创新概况。其中主要有: 互感器误差补偿的研究和创新, 并据此研制各种规格的测量用互感器、带升流器或升压器的高准确度互感器、电流比较仪、双级互感器、比较仪式互感器校验仪及其整体检定装置和数显校验仪等。并展望今后在这方面的发展和创新, 如二次为小电流和小电压的互感器以及计算机在互感器及其测试中的应用等。

[关键词] 互感器; 比例标准; 校验仪; 误差补偿

1 前言

测量用互感器及其测试仪器是经典的电工仪器, 发展至今约有一个世纪。对这样的仪器, 是否还有可能发展和创新? 答案是肯定的。因为随着生产技术的发展, 一方面对互感器提出各种新的要求, 另一方面新材料新技术提高了互感器的性能。

提高测量用互感器性能的一个重要途径, 是对其误差进行补偿。因此, 所有互感器无不采用相应的补偿方法, 以提高其准确度。对补偿方法的研究, 始于20世纪20年代, 先后提出了许多补偿方法, 主要有双级电流互感器及其负荷补偿法、零磁通电流互感器及零磁通补偿法、磁分路补偿原理^[1]等。

在电力系统用的电流互感器中, 实际采用的都是最简单的匝数或分数匝补偿, 基本上不采用上述复杂的补偿方法。在精密电流互感器中, 除采用分匝数补偿外, 一般多用电容补偿相位差, 只有磁耦合式互感器校验仪, 采用了与其相配合的双级电流互感器作为标准电流互感器。而在电压互感器中, 实际采用的就是匝数或分数匝补偿。

40年代和50年代, 原苏联生产的电流互感器

中, 对环形铁心和方形叠片铁心互感器分别采用了反激磁和磁分路补偿^[2]。

互感器校验仪是互感器的主要测试仪器。它早期是直接比较式的, 由于仪器受电阻和电容元件准确度的限制, 后来制成测差式的, 使校验仪的线路和结构得到简化, 性能得到提高。它的准确度只要有1~3级就能满足使用要求。

2 互感器的发展与创新

2.1 圆环磁分路补偿电流互感器

伴随50年代冷轧硅钢片生产的发展, 在各种冷轧硅钢片铁心中, 又以卷制的环形铁心磁导率最高, 因而在电流互感器产品中, 首先采用冷轧硅钢片环形铁心取代原热轧硅钢片的环形铁心和方形叠片铁心。这需要研究与此相适应、效果更好的新补偿方法。为此作者利用互感器校验仪, 测试了互感器和铁心的有关参数, 在原反激磁补偿和磁分路补偿的基础上, 提出了圆环磁分路补偿结构原理及其计算公式^[3], 采用此补偿法, 不仅能对电流互感器的比值差和相位差都有补偿作用, 而且还能改善比值差和相位差的线性度, 从而研制成圆环磁分路补偿电流互感器。1968年为全国互感器统一设计

所采用,被列入《电机工程手册》,一直生产至今,成为国内产量最大的电流互感器,现年产量达数百万台,产值近亿元。

2.2 高准确度电流互感器

60年代,国内生产的互感器准确度最高为0.1级,而0.05级以上的高准确度互感器全靠进口。作者在详细分析各种补偿方法之后,针对高准确度电流互感器二次负荷变化小的特点,提出了低磁通RC补偿法。即用一辅助铁心承担大部分负荷,使主铁心负荷小、磁通低,再加上电容补偿,使误差显著减小。据此研制成了不仅性能好,而且体积小、质量轻的高准确度电流互感器。在此研究基础上,归纳现有的各种电流互感器误差补偿方法,提出了电流互感器误差磁势补偿和电势补偿原理及其计算公式^[3]。这样,对电流互感器误差的补偿方法有了系统和完整的认识,从中推导出许多新的补偿方法,并根据实际需要选择更合理和效果更好的补偿方法。从而研制成了0.1~100 A/5 A和5~5 000 A/5 A等各种规格0.01级至0.05级高准确度电流互感器,以满足国内的需要。

1991年,West等提出了双级补偿的新线路^[4],用来补偿固定的双级负荷,以提高电流互感器的准确度,并用一台单电流比100 A/1 A的样器作了试验验证。相类似的补偿方法国内早在80年代已用于高准确度电流互感器的产品中^[5]。这说明国内外高准确度电流互感器的发展和创新,既有所不同,又有相通之处。

2.3 高准确度电压互感器

根据电流互感器的研究成果,对电压互感器的误差补偿进行了系统的研究,提出了电压互感器误差电流补偿和电压补偿原理及其计算公式^[3],填补了这方面研究的空白。从中导出了电压互感器空载误差补偿法,并据此研制成0.01级高准确度电压互感器。

在高压、高准确度电压互感器的研制中,主要探讨了高压多电压比电压互感器中分布电容电流造成的误差,提出了采用一次抽头和二次抽头两种方案,并分析了二者的优缺点及采取的相应措施,研制成3~10 kV/0.1 kV高准确度电压互感器^[3]。

70年代以来,国产10 kV及以下的0.01级至0.05级各种规格的高准确度电压互感器满足了国内的需要。

2.4 带升流器电流互感器和带升压器电压互感器

精密互感器和升流器或升压器(即小型单相电源变压器)经常是一起使用的,小变压器所采用的方形叠片铁心已改用冷轧硅钢片环形铁心。这样,有可能将互感器和变压器合成一体。通过研究,提出并研制成新型0.01级至0.05级带升流器电流互感器和带升压器电压互感器^[3]。其中电流互感器与升流器公用一次(升流器的输出)绕组;而电压互感器与升压器公用一个铁心。它可作为标准互感器用来检定0.05级及以下准确度的互感器,具有接线简单、使用方便等特点,在国内得到了广泛的应用。

3 电流与电压比例标准的发展和创新

检定高准确度互感器,需要准确度为0.002级及以上的比例标准。电流比例标准主要有双级电流互感器、零磁通电流互感器和电流比较仪。电压比例标准主要有感应分压器双级电压互感器和电阻或电容分压器等。

3.1 电流比例标准

为了检定高准确度电流互感器,60年代,在低磁通补偿的基础上,研究了调节零磁通的方法和结构,提出了零磁通电流互感器及其调零线路,使电流互感器真正运行在零磁通下,有很高的准确度。同时参照国外当时已出现的电流比较仪(也运行于零磁通,其准确度与零磁通电流互感器相当)及其检定线路^[6],研制成了0.1~10 000 A/5 A的零磁通电流互感器自检系统,其最高准确度达到了 0.5×10^{-6} ^[7]。

对上述三种电流比例标准的分析表明,零磁通电流互感器除了文献[1]所介绍的线路(一种电势补偿线路,且无检测绕组)外,还有多种磁势补偿和电势补偿线路。双级电流互感器与补偿式电流比较仪基本线路相同,从前者到后者,经过了约40年的发展,增添了一个检测绕组,用来监视电流比较仪的零磁通。正是这个区别,前者运行在低磁通,后者运行在零磁通,因而后者的准确度比前者提高1个数量级。补偿式电流比较仪加上调零结构,也可成为双级补偿的零磁通电流互感器。因此,无论是一般电流互感器还是双级电流互感器或者电流比较仪,只要有检测绕组和相应的调零结构,都可成为零磁通电流互感器^[7]。

在此基础上,研究了提高电流比较仪准确度的结构和补偿方法,设计了新的调零结构,并研制成

多种规格电流比较仪及其自检系统。它的性能：最高准确度达到 0.2×10^{-6} ；一次电流最小达到 0.1 A，准确度为 5×10^{-6} ，最大达到 5 kA，准确度为 1×10^{-6} ；80 年代末与德国的电流比较仪进行了比较，结果：误差的差值仅为 0.5×10^{-6} 。笔者还与文献 [6] 的加拿大作者进行了交流。

90 年代，根据用户的需要，还研制成了 0.5~500 A/5 A 的中频电流比较仪自检系统，准确度为 $5 \times 10^{-5} \sim 2 \times 10^{-6}$ 。

70 年代以来，国内已生产了 0.002 级或 0.001 级的 0.1~100 A/5 A 和 5~5 000 A/5 A（或 10 000 A/5 A）电流比较仪 200 多台和 10 多套电流比较仪自检系统。我国拥有的电流比较仪及其自检系统之多，堪称世界之最。

3.2 电压比例标准

同样，为了检定高准确度电压互感器，参照双级电流互感器的原理，研制了低压双级电压互感器。在高压双级电压互感器研究中着重探讨了在高电压下的泄漏电流问题，从 1975 年开始，先后研制成一次电压为 50 V~35 kV 的各种规格双级电压互感器，其准确度达到 0.001 级或 0.002 级。在此基础上又采用了补偿装置，研制成一次电压为 $(110/\sqrt{3})$ kV 和 $(220/\sqrt{3})$ kV 电压比例标准，其准确度分别为 0.002 级和 0.005 级^[8]。

在感应分压器的研制中，根据国内通用的参考电势检定方法，将参考电势与感应分压器做成一体，于 1987 年开发出可自校的多盘感应分压器产品，其准确度达到了 1×10^{-6} （当时国外相同规格的感应分压器准确度为 2×10^{-6} ，且不能自校），可作为各使用单位的电压比例最高标准。

上述 10 kV 以下的各种规格电压比例标准，从 80 年代开始已在国内得到了广泛的使用。

4 互感器校验仪的发展与创新

60 年代以前，国内使用的互感器校验仪不是国外进口的就是仿制国外的，而且这些校验仪都只能检定 0.1 级以下互感器。随着我国 0.05 级以上高准确度互感器的研制成功，急需能检定高准确度互感器的校验仪。与此同时，国外出现了电流比较仪及其检定线路^[6]，但是，这种线路专门用于检定高准确度电流互感器。为了扩大这种比较仪检定线路的功能，经过多年的探索，采用电流比较仪扩大测电流互感器误差的量限，用不同的电阻改变测

电压互感器误差的量限，从而研制成功国内首台互感器校验仪——比较仪式互感器校验仪，可以检定 10 级至 0.01 级电流互感器和电压互感器^[9]。原来只能用于奥地利磁耦合式上的双级电流互感器也可在比较仪式校验仪上使用，为双级电流互感器的发展提供了有利的条件。新型校验仪不仅结构简单，应用范围广，而且性能良好，很快取代了国内所有互感器校验仪，得到了广泛的应用。

对于互感器校验仪的检定，国内于 70 年代前一直采用原苏联提出的一种针对其产品的分部件检定方法，检定相应型号的校验仪。70 年代我国提出了采用整体检定方法，可以对不同型号的校验仪采用统一的检定方法。据此，研制成功互感器校验仪整体检定装置^[9,10]。它是由单相移相电源及标准互感器校验仪组成的。后者是上述比较仪式互感器校验仪。整个装置经过精心的设计和制作，其准确度达到了 0.1 级，可以用来检定所有 1~3 级互感器校验仪。

80 年代，国外开始出现各种应用电子线路和微机的自动互感器校验仪（简称数显校验仪）。90 年代国内也研制成功了各种数显校验仪^[10]，使互感器的检定，走上了自动检测的道路。并且开创了微机在互感器及其测试仪器上的应用。

如上所述，采用一般电流比较仪，其准确度为 0.002 级，可以检定高准确度电流互感器，但必须使用比较仪检定线路*。这时如改用互感器检定线路，则比较仪成为双级电流互感器，其准确度下降为 0.05 级至 0.01 级。比较仪检定线路即使用比较仪式互感器校验仪，仍需要手动调节平衡。数显校验仪无需调节平衡就能测试，又没有比较仪检定线路。国内于 80 年代末生产过一种有比较仪检定线路的自平衡数显校验仪，性能不够理想，有待改进提高。因此迫切要求能在所有数显校验仪上检定高准确度电流互感器。经过多年的努力，研制成可用于所有校验仪的 0.002 级 0.1~120 A/5 A 和 5~10 000 A/5 A 双级电流互感器^[11]。这样，检定高准确度电流互感器实现了自动检测。同时，5~50 A/5 A 双级电流互感器的准确度已达 1×10^{-6} ^[12]。双级电流互感器的原理于 1922 年提出，用在磁耦合式互感器校验仪上（其准确度为 0.01 级），到 90 年代得到了进一步的发展和应

* 如果用自平衡式电流比较仪，则可不使用比较仪检定线路

5 发展和创新的展望

综上所述,自从50年代末以来,随着生产的发展和需要,国内精密互感器及其测试仪器有了很大的发展和创新。现在国内各试验研究单位所使用的精密互感器及其测试仪器,都是近二三十年来的科技成果。随着计算机的普遍应用,对互感器及其测试仪器将会有更深远的影响。

5.1 二次小电流或小电压的互感器及其测试仪器

微机要求输入信号的电压一般为0.5~5 V,因此要求电流和电压经过互感器转换为0.5~5 V。对于电流互感器,二次电流越小容量越小。已出现二次电流为2.5~100 mA的毫安级电流互感器、转换为上述电压的电流/电压转换器、以及二次电压为0.5~5 V的小电压互感器,并要求配以相应的测试仪器^[13]。

目前,上述小电流互感器的一次电流多为5 A,小电压互感器的一次电压多为100 V,主要作为电工仪表和控制系统的部件,今后有可能发展为电力系统直接用的互感器。其电流比为5~1 000 A/0.05A^[14],电压比为100~10 000 V/5 V。

检定这些互感器的校验仪有两种发展趋势:一是研制相应小电流和小电压的校验仪;二是利用现有校验仪或稍加改进,采用一次5 A或100 V供电。前者校验仪的规格可能增多,后者则需解决校验仪的直读问题。对于小电流互感器的检定,如采用电流比较仪和比较式校验仪^[13,14],一次供电就能直读,是比较好的检定方法。

检定电流/电压转换器有两种方案:一是采用标准转换器整体检定被检转换器^[15],检定比较方便,检定结果直观,但是配制高准确度电阻有一定的困难,且现有的校验仪用来检定转换器的分辨力也不够,仅适用于检定低等级或者只要求线性度的转换器;二是转换器的电流互感器和电阻分别检定,这是比较容易实现的,就是上述标准转换器本身也需分别检定。

无论采用何种检定方法,都需要一整套新的标准互感器或比例标准,同时还要研究这些新的比例标准与原来二次电流为5A的电流比例标准相衔接的问题。

5.2 提高互感器测试的自动化和智能化水平

在一般互感器的测试中,现已出现利用微机等高新技术制作的各种规格全自动互感器校验台,有

的还能对测试结果进行数据处理^[16]。其自动化和智能化水平还可以进一步提高,测试更加简便。

现在电流比较仪自检系统的检定和感应分压器的检定,仍然依靠手动操作,特别是自检系统检定的工作量又大又繁琐,需实现自动化和智能化。

5.3 现场校验仪和虚拟校验仪

互感器检定除了互感器校验仪以外,还需要标准互感器和电源设备。在变电站现场检定大电流互感器和高压电压互感器时,需要携带极其笨重的上述检定设备。为了简便现场互感器的检定,最近澳大利亚红相公司提出了不用标准电流互感器和电流电源的现场电流互感器校验仪。其工作原理是根据电流互感器误差计算公式,测定相应参数并通过微机软件计算,实现电流互感器的误差测定^[17]。这种现场电流互感器校验仪用所测参数算出互感器误差,且能扣除其补偿值。但是对此校验仪的检定尚需进一步探讨和完善。这样,就有可能进一步扩大新原理校验仪的应用范围。

此外,利用计算机制作虚拟校验仪,也是校验仪发展和创新的又一方向。

上述展望只是其中的一小部分,这就要求互感器电测专业与计算机专业更紧密的结合,并期待相关专业的科技人员密切合作和共同努力,取得更大的发展。

参考文献

- [1] Hague B. Instrument transformers [M]. London, England, 1936
- [2] Барзилович В М. Высокочастотные трансформаторы тока [M]. Москва, 1957
- [3] 赵修民, 测量用互感器 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1986
- [4] West J L, Miljanic P N. An improved two-stage current transformer [J]. IEEE Trans. Instrum. and Meas., 1991, IM-40 (3): 633~635
- [5] 赵修民. 双级低磁通电容补偿电流互感器 [P]. 中国专利: 87200450. 3, 1987-01-13
- [6] Moore W J M, Miljanic P N. The current comparator [M]. London, 1988
- [7] 赵修民. 电流比例标准 [M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1989
- [8] 赵修民, 赵屹涛. 电压比例标准 [M]. 太原: 山西科学教育出版社, 1993

(下转第86页)

- [12] S. P. J. Namal Senanayake, Fereidoon Shahidi. Enzymatic Incorporation of docosahexaenoic Acid into borage [J], *Oil. J. Am. Oil Chem. Soc.* 1999, 76 (9): 1009~1015

Advances in Studying Functional Components of Oil-Bearing Materials and Developments of Related Technology

Zhang Genwang

(Zhengzhou Grain College, Zhengzhou 450052, China)

[Abstract] Oil-bearing materials are the main source of vegetable oils and proteins. Some fatty acids and certain structured lipids have particular biological functionality. Important progress has been made in this respect in recent years. Certain amount of so-called wastes are produced simultaneously along with the vegetable oils and proteins production, which have not been utilized perfectly for a long time. Actually, many value-added products can be isolated from the "wastes", such as lecithin, tocopherols, tocotrienols, plant sterols and stanols, isoflavones, saponins, phytic acids, trypsin, oligosaccharides, phenolic acids, etc. Then are considered to be functional components. Due to the particularity of the functional components, current technology and equipments of oil industry are not totally adaptable to the requirement of their isolation. Thus, the innovations of fats and oils technology as well as the utilization of biotechnology in making structured lipids are of great significance.

[Key words] oil-bearing materials; functional components; technological development

(上接第 76 页)

- [9] Zhao Xiumin. New comparator-type calibrator for instrument transformers [J]. *IEEE Trans. Instrum. and Meas.*, 1987; IM-36 (3): 755~758
- [10] 赵修民, 赵屹涛. 互感器校验仪 [M]. (第二版). 太原: 山西科学教育出版社, 1996
- [11] 赵修民. 0.002 级双级电流互感器的研制 [J]. *仪表技术*, 1998, (5): 12~14, 24
- [12] 赵修民. 补偿式电流比较仪和双级电流互感器 [J]. *电测与仪表*, 1999, (8): 15~18, 45
- [13] 赵修民. 小型 mA 级电流互感器的参数选择和误差限值 [J]. *仪表技术*, 1994, (3): 5~8, 32
- [14] 赵屹涛. 二次电流为 0.05A 的电流互感器及其检定 [J]. *电测与仪表*, 1998, (12): 25~27.
- [15] 彭时雄. 0.005 级高精度交流电流-电压变换器 [J]. *电测与仪表*, 1991, (11): 22~27
- [16] 赵屹涛, 夏建军. 智能型全自动互感器校验台 [J]. *互感器通讯*, 1997 (4): 19~22
- [17] 郭剑峰. 电流互感器现场测试技术的革命 [J]. *电测与仪表*, 1999 (4): 22~23

Development and Creations of Measuring Instrument Transformers and Their Testing Equipment

Zhao Xiumin Zhao Yitao

(Shanxi Provincial Institute of Instrument Transformers, Shanxi Taiyuan 030009, China)

[Abstract] The development and creation of measuring instrument transformers and their testing equipment in improving accuracy and performance since the end of fifties is described. They include the development in error compensation for instrument transformers, high accuracy instrument transformers with a current booster or voltage booster, current comparators and two-stage instrument transformers, the comparator-type calibrators and its testing instruments, digital calibrators, etc. Future work in this field, will involve the development of instrument transformers with small secondary current and voltage, application of computers and microprocessors in instrument transformers and their testing equipment, etc.

[Key words] instrument transformer; ratio standard; calibrator; error compensation